干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY



# 中国北方农牧交错带耕地时空分异及驱动因素

陶泽涪[1,2]， 王世清[1,2]， 孙丕苓[1,2,3]， 李凯迪[1,2]， 田 文[1,2]， 韩潇潇[1,2]

（1. 曲阜师范大学地理与旅游学院，山东 日照 276826；2. 日照市国土空间规划与生态建设重点实验室，山东 日照 276826；3. 中国农业大学土地科学与技术学院，北京 海淀 100193）

**摘 要**：耕地是保障国家粮食安全的重要载体。以中国北方农牧交错带为例，基于2000、2010、2020年3期遥感影像数据，综合运用转移矩阵、空间自相关分析、空间计量模型等方法系统分析了2000—2020年中国北方农牧交错带耕地时空分异特征及影响因素。研究结果表明：（1）2000—2020年中国北方农牧交错带耕地面积由268959.49 km$^2$增加到269471.62 km$^2$，耕地变化主要表现为耕地与林地、草地之间的相互转化。在垂直方向上，耕地变化主要发生于海拔1000~2000 m以及坡度0~5°的地区。（2）2000—2020年中国北方农牧交错带耕地分布具有明显的空间集聚特征，整体呈现东高西低、北高南低的空间格局。耕地主要分布于研究区东北部的河谷平原及中西部的黄河谷地，地形较为复杂的高原边缘山区、丘陵沟壑区耕地分布较少。（3）2000—2020年气候、地形等自然环境因素是中国北方农牧交错带耕地空间分布的基础条件，社会经济因素和区域政策因素是耕地时空分异的重要推动因素。其中，年均气温、道路密度以及生态退耕政策、土地利用管控政策等对耕地时空分异的影响为正，坡度、经济密度对耕地时空分异的影响为负。

**关 键 词**：耕地；时空分布；驱动因素；中国北方农牧交错带

**文章编号**：

近年来，我国经济发展进入新常态，新型工业化、城镇化建设深入推进，中国国土空间开发利用格局发生了剧烈变化，建设空间、生态空间及生产空间格局发生了明显重构[1]。区域土地利用变化及驱动因素研究已成为全球变化研究的前沿和热点问题[1-2]，人类活动与自然环境对土地利用变化的综合研究成为土地利用变化驱动机制研究的重要内容[3]。特殊区域特定土地利用类型的时空变化及驱动机理成为当前土地利用覆被变化研究的经典命题[4]。中国北方农牧交错带作为我国北方重要的生态防线，地处干旱、半干旱过渡区，生态环境敏感且脆弱，受人类活动影响显著，且具有不同于单一农区和牧区的独特经济形态，一直是土地利用覆被变化研究关注的热点区域。耕地是农业生产中最基础的物质资料，为人类的生存发展提供物质基础，同时兼有保障国家粮食安全、促进乡村产业发展与生态维护等重要作用。我国是人口大国，粮食与生态安全始终是与国家自立、社会稳定和经济可持续发展密不可分的全局性的重大战略问题。因此，耕地资源变化的动态监测及影响因素识别受到社会各界的广泛关注。城市文明建设迅速推进以及退耕还林等生态政策的实施对耕地资源变化影响强烈，而人类社会经济活动、政策因素与自然环境的交互作用对耕地变化的影响难以定量测度，故耕地资源时空格局变化的驱动因素定量研究一直是研究的难点[5]。

目前，国内外学术界对耕地资源的研究主要集中于耕地质量监测分析与等级评定、耕地利用效率与形态研究、耕地功能演变的时空特征及其驱动机制研究、耕地利用功能转型与土地流转研究、耕地

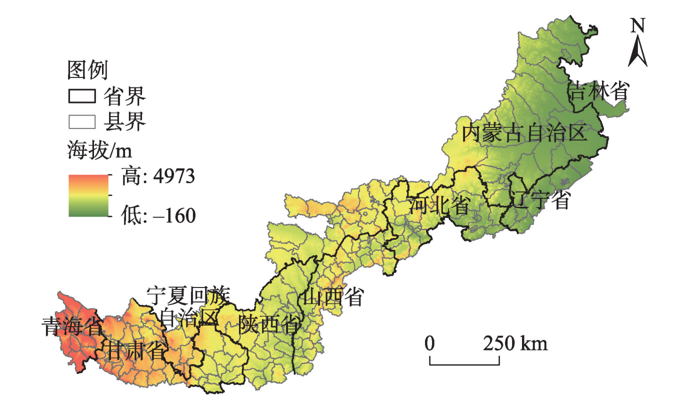
**收稿日期**：2021-04-06； **修订日期**：2021-07-30
**基金项目**：教育部人文社会科学研究青年基金项目（19YJCZH144）；山东省自然科学青年基金项目（ZR2019QD006）资助
**作者简介**：陶泽涪（2000-），男，本科生，主要从事土地变化及其生态效应研究. E-mail: tzf0824@126.com
**通讯作者**：孙丕苓（1984-），女，副教授，主要从事土地利用/覆被变化及其生态效应、土地利用多功能、乡村地理等方面的研究.
E-mail: spling86@qfnu.edu.cn

变化与粮食生产耦合关系研究、耕地资源的时空变化分析、耕地资源的集约利用、耕地撂荒与基本农田保护管理等方面的研究[6]。相关研究主要采用空间误差模型、超效率数据包络分析模型(SE-DEA)、大尺度土地生产力评估模型(GAEZ)、全球尺度生产力模型(GLO-PEM)、耕地生产力遥感模型(AGRO-VPM)、恩格尔-格兰杰两步测算模型、偶合动态模型等方法模型[7-9]。目前,农牧交错带已有研究主要侧重于植被覆盖时空变化及影响因素研究、耕地土壤性状与质量研究、耕地生态系统服务等方面的研究[10-14]。随着退耕还林还草等生态工程的推进,中国北方农牧交错带耕地时空格局及驱动因素发生了巨大变化。在生态文明建设背景下,系统剖析中国北方农牧交错带耕地时空格局演变规律对保障粮食安全、改善生态环境尤为重要,从自然环境、社会经济、区域政策等方面进行宏观与微观相结合定量辨识影响耕地时空分异的关键因子具有重要意义。

基于此,本研究以中国北方农牧交错带为研究区域,系统分析生态退耕政策实施以来2000—2020年中国北方农牧交错带耕地时空分异特征及驱动机制,以期为耕地资源的保护与可持续发展提供科学参考。

## 1 研究区概况

北方农牧交错带指我国北方传统农业和畜牧业区域的过渡发展地带,地处34°43′31″~46°57′46″N,100°57′11″~125°34′11″E之间,包括内蒙古、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、甘肃、宁夏、青海等9省(自治区)的226个县(旗、市、区)(图1)。全区总面积为699078.78 km²,海拔高程-160~4973 m。地形类型复杂多样,地势西南高东北低,呈现出从平原向山地、高原过渡的态势。农牧交错带位于温带大陆性气候区,年平均降水量为300~450 mm。随着降水量自东向西减少,植被由森林草原逐步过渡到荒漠草原。中国北方农牧交错带是保护我国中东部地区免受风沙侵扰的生态安全屏障和西部地区重要的涵养水土地带[15]。截至2019年底,中国北方农牧交错带总人口达7000多万人,其生态安全的维护对我国可持续发展具有重要意义。




注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1584号的标准地图制作,底图无修改。下同。

图1 中国北方农牧交错带位置示意图

Fig. 1 Location of the agro-pastoral ecotone of northern China

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

本研究采用的基础数据主要包括遥感影像、地形数据、气象数据等。中国北方农牧交错带2000年和2010年Landsat-TM影像和2020年Landsat-OLI影像主要源于地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn/)。结合ENVI 5.1软件,根据研究区的行政边界裁剪遥感影像,运用人机交互式解译法进行信息提取,借助Google Earth和野外抽样调查进行数据修正和精度检验。农牧交错带3期影像解译总体精度分别为87.68%、89.72%和88.59%,Kappa系数分别为0.85、0.87和0.86,表明解译结果能够满足本研究的需要。参照国家基本资源与环境本底动态遥感调查数据库的分类体系,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6大类[16]。地形数据包括海拔、坡度、坡向和地形起伏度,通过ASTER GDEM(30 m分辨率)高程数据提取得到;气象数据包括逐年气温、降水量等,主要来源于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/),基于ArcGIS软件平台运用反距离加权法进行空间插值;交通道路(含铁路、公路)源于电子交通地图(2000年和2020年);人口、地区生产总值等社会经济统计数据主要来源于北方农牧交错带相关省区相应年份的统计年鉴,其中2020年相关数据来源于各县(市、区、旗)的国民经济和社会发展统计公报,部分缺失数据用2019年数据替代。

依据气象数据的空间分辨率确定土地利用管制及生态退耕面积测度的地理格网设置为1 km×1 km,土地利用管制与生态退耕数据主要来源于各县(市、区、旗)自然资源局、林业局、农牧局的相关生态工程实施效果统计资料及实施规划图件,土地利用管控范围通过耕地保护、生态建设工程、土地利用用途分区相关图件矢量化获取。基于ArcGIS 10.4软件平台对图件资料进行格式转换、掩膜裁剪、矢量数据栅格化等处理,将所有空间数据统一重采样为1 km×1 km空间分辨率,并统一投影到Albers投影系下。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 耕地变化分析** 运用土地利用转移矩阵分析中国北方农牧交错带2000—2020年耕地与其他土地利用类型之间的相互转化关系,表征耕地来源构成和转出去向[17],其表现形式为:

$$S_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:$S_{ij}$表示土地利用类型在一定时期内由$i$转移为$j$的面积(km²);$i$、$j$($i$, $j$=1, 2,⋯, $n$)分别表示转移前和转移后的土地利用类型;$n$表示土地类型数。

**2.2.2 空间自相关分析** 空间自相关分析是检验某一空间要素或某一空间要素属性值的空间分布状况与其临近空间区域之间关联程度的方法[18-19],选取全局空间自相关分析2000—2020年中国农牧交错带耕地空间分布特征,采用局部空间自相关方法分析耕地分布的空间集聚特征。其计算公式为[20]:

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq i}^{n}W_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{s^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq i}^{n}W_{ij}} \tag{2}$$

$$I_i=\frac{(x_i-\bar{x})\sum_{j=1}^{n}(x_j-\bar{x})}{s^2} \tag{3}$$

$$W_j=\frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^{n}\sigma_j} \tag{4}$$

式中:$I$表示空间自相关分析系数;$n$表示研究对象空间的区域数;$s^2=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2$;$x_i$、$x_j$表示在相邻的2个空间地域单元$i$、$j$的耕地面积(km²);$\bar{x}$表示所有空间地域单元耕地面积的均值;$W_{ij}$表示空间权重矩阵;$I_i$表示第$i$个区域的局部莫兰指数;$W_j$表示空间地域单元$j$标准差的离散程度;$\sigma_j$表示空间地域单元$j$的标准差。

### 2.3 影响因素实证模型选择

**2.3.1 解释变量的选取** 耕地作为最基本的一项自然资源,与人类的生产生活联系十分紧密,其动态变化受到自然环境、社会经济活动和区域政策因素的综合影响[21-22]。据此,本研究以耕地面积为因变量,从自然环境因素、社会经济因素、区域政策因素等方面选取解释变量分析中国北方农牧交错带耕地时空格局特征的影响因素(表1)。其中,选择年

表1 耕地时空分异的解释变量

Tab. 1 Explaining variables of cropland spatio-temporal differentiation

| 驱动因素 | | 解释变量 | 变量解释 |
|---|---|---|---|
| 自然环境因素 | 气候 | 年均降水量/mm | 基于ArcGIS空间插值法获取各地域单元的年均降水量 |
| | | 年均气温/℃ | 基于ArcGIS空间插值法获取各地域单元的年均气温 |
| | 地形 | 高程/m | 基于ArcGIS分析工具获取农牧交错带的数字高程模型(DEM)数据 |
| | | 坡度/(°) | 基于DEM数据提取各地域单元的坡度平均值 |
| | | 坡向 | 基于DEM数据提取各栅格单元的坡向 |
| | | 地形起伏度/m | 基于ArcGIS的分区统计获取各地域单元的地形起伏度 |
| 社会经济因素 | | 人口密度/$10^4$人·$km^{-2}$ | 各县(市、区、旗)的国民经济和社会发展统计公报 |
| | | 经济密度/$10^8$元·$km^{-2}$ | 各县(市、区、旗)的国民经济和社会发展统计公报 |
| | | 路网密度/km·$km^{-2}$ | 各县(市、区、旗)的国民经济和社会发展统计公报 |
| 区域政策因素 | | 生态退耕工程 | 根据每个格网单元内生态退耕面积是否为0。若不为0,表明实施了生态退耕工程,赋值为1;若为0,表明未实施生态退耕工程,赋值为0。 |
| | | 土地利用管制 | 根据每个格网单元内土地利用管制面积是否为0。若不为0,表明实施了土地利用管制,赋值为1;若为0,表明未实施土地利用管制,赋值为0。 |

均降水量、年均气温、高程、坡度、坡向、地形起伏度6个解释变量表征自然环境因素，选取人口密度、经济密度、路网密度3个解释变量表征社会经济因素，以生态退耕政策和土地利用管制来表征区域政策因素。

**2.3.2 空间计量模型** 运用空间滞后模型和空间误差模型来分析耕地面积与其各个影响因素之间的关联性[23-24]，分辨影响中国北方农牧交错带耕地时空格局演变的关键因子。基于ArcGIS和GeoDa软件平台，通过耕地分布的空间自相关性检验，并运用Lagrange Multipliter（LM）进行空间计量模型的选择[25]。耕地的空间分布特征不仅与本地域单元的解释变量有关，而且还受到相邻地域单元耕地资源的影响。

运用空间滞后模型来分析相邻地域单元的耕地分布对本地域单元耕地分布的影响。其计算公式为：

$$Y=\rho WY+\beta X+\varepsilon \tag{5}$$

式中：$Y$表示本空间地域单元的耕地面积（$km^2$）；$\rho$表示空间效应系数；$W$表示空间权重矩阵；$\beta$表示解释变量的系数；$X$表示解释变量矩阵；$\varepsilon$表示随机误差项。

运用空间误差模型来探究相邻地域单元的解释变量对本地域单元耕地面积的影响，并通过误差项来体现相邻地域单元耕地面积之间的关联程度。其计算公式为：

$$Y=\beta X+\lambda W\varepsilon+\mu \tag{6}$$

式中：$Y$表示本空间地域单元的耕地面积（$km^2$）；$\beta$表示解释变量的系数；$X$表示解释变量矩阵；$\lambda$表示空间误差系数；$W$表示空间权重矩阵；$\varepsilon$表示随机误差项；$\mu$表示独立随机误差项。

## 3 结果与分析

### 3.1 中国北方农牧交错带耕地面积及转化特征

2000—2020年农牧交错带耕地面积由268959.49 $km^2$增加到269471.62 $km^2$，耕地面积增加512.13 $km^2$，占地类转换总面积的38.55%。期间，耕地面积先减少后增加。2000—2010年，耕地面积减少4743.05 $km^2$，减少的耕地主要转换为草地、建设用地等地类，其转换面积分别为11699.20 $km^2$、1730.73 $km^2$，分别占耕地转出面积的80.11%、11.85%；耕地转草地主要分布于张北县、古交市、阿鲁科尔沁旗等区域；耕地转建设用地主要分布于内蒙古集宁区、大同城区、皋兰县等区域（图2）。新增耕地主要来源于草地和建设用地，其转换面积分别为7389.44 $km^2$、1036.64 $km^2$，各占新增耕地面积的74.94%、10.51%。草地转耕地主要发生于阿鲁科尔沁旗、扎鲁特旗、突泉县、定边、盐池等区域，建设用地转耕地零散分布于宜川、乡宁等区域。2000年以来，国家大力推行退耕还林还草生态建设工程，中国北方农牧交错带耕地不断减少。同时，随着人口数量的增加，工业化与城镇化进程的快速推进，非农建设大量占用耕地，耕地面积持续减少。2010—2020年，耕地面积增加5255.18 $km^2$，新增耕地主要来源于林地和草地，林地和草地转耕地的面积分别为2533.31 $km^2$、33470.63 $km^2$，各占耕地转入总面积的6.62%、87.49%。流失耕地主要转变为草地和建设用地，转换面积分别为20878.26 $km^2$、8115.65 $km^2$，各占耕地转出面积的63.27%、24.59%。这种变化主要发生于固阳县、武川县、永登县等地。随着

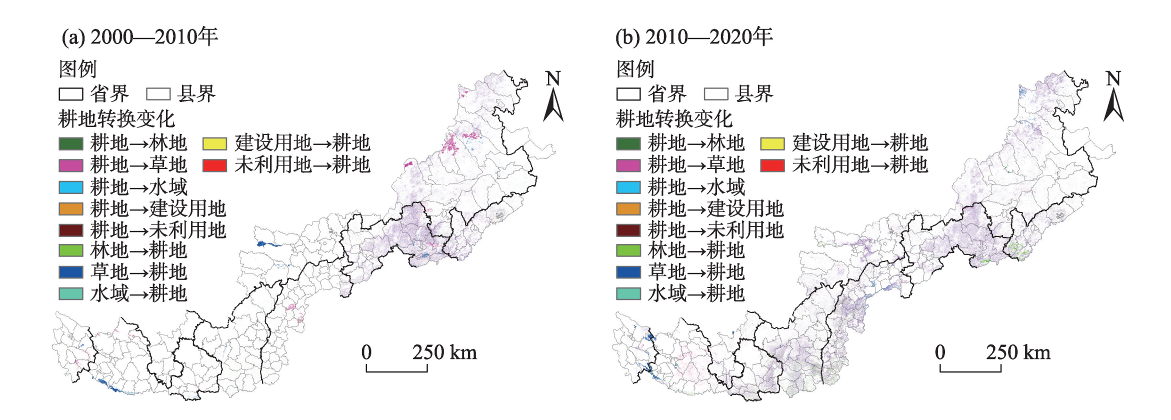



图2 2000—2020年中国北方农牧交错带耕地转换变化

Fig. 2 Mutual transitions of cropland in the agro-pastoral ecotone of northern China during 2000—2020

**表2　中国北方农牧交错带耕地变化地形梯度特征**

**Tab. 2　Terrain gradient characteristics of cropland change in the agro-pastoral ecotone of northern China**

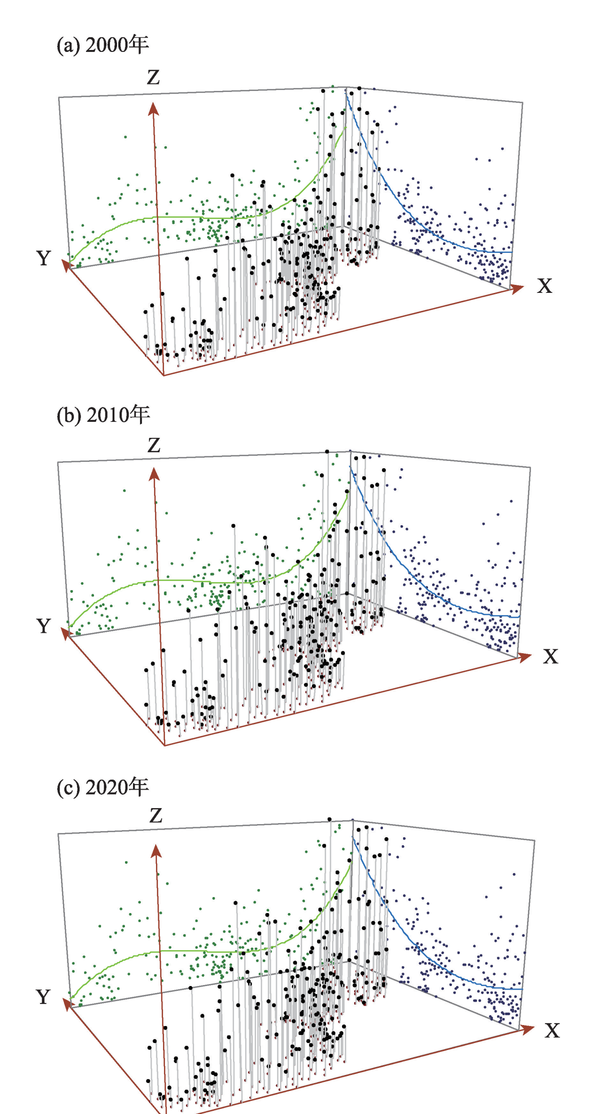
| 高程 | | | 坡度 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 高程分级/m | 各高程等级比例/% | 耕地变化比例/% | 坡度分级/(°) | 各坡度等级比例/% | 耕地变化比例/% |
| <200 | 7.34 | 7.97 | 0~5 | 41.21 | 50.54 |
| 200~500 | 13.13 | 17.16 | 5~10 | 22.26 | 23.27 |
| 500~1000 | 17.78 | 17.28 | 10~15 | 15.30 | 12.72 |
| 1000~2000 | 52.68 | 53.40 | 15~25 | 16.17 | 11.10 |
| >2000 | 9.07 | 4.19 | >25 | 5.06 | 2.37 |

人口数量的增加，粮食安全压力的增加，毁林（草）开荒现象不断出现。

2000—2020年中国北方农牧交错带耕地时空变化地形梯度差异明显（表2）。期间，耕地变化主要发生于1000~2000 m高程梯度区和0~5°坡度梯度区，其中1000~2000 m高程梯度区耕地变化面积为273.48 $km^2$，占耕地变化总面积的53.40%，0~5°坡度梯度区耕地变化面积为258.83 $km^2$，占耕地变化总面积的50.54%。受地形因素的限制，高程>2000 m和坡度>25°地形梯度区耕地分布稀少，耕地变化面积分别占耕地变化总面积的4.19%和2.37%。2000—2020年中国北方农牧交错带新增耕地向<500 m高程梯度区和<5°坡度梯度区扩展。

### 3.2　中国北方农牧交错带耕地时空分布特征

**3.2.1　中国北方农牧交错带耕地总体分布特征**　利用ArcGIS 10.4软件中的趋势分析工具（Trend analysis tools）对2000、2010、2020年中国北方农牧交错带县域耕地分布的全局趋势进行三维通视分析，以耕地面积作为Z轴，X、Y轴分别为正东、正北方向，得到空间可视化结果（图3）。结果显示，2000—2020年中国北方农牧交错带耕地分布空间差异显著，耕地分布整体呈现东高西低、北高南低的空间格局。




注：X轴表示正东方向，Y轴表示正北方向，Z轴表示耕地面积。

图3　2000—2020年中国北方农牧交错带耕地分布趋势分析

Fig. 3　Trend analysis of cropland distribution in the agro-pastoral ecotone of northern China during 2000—2020

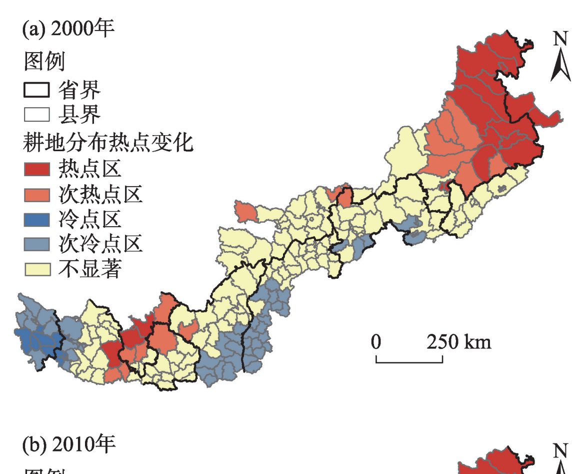
**3.2.2　中国北方农牧交错带耕地时空分异特征**　利用ArcGIS 10.4软件计算2000、2010、2020年耕地分布全局Moran's *I*指数，由表3可知，2000—2020年耕地分布Moran's *I*指数介于0.289~0.294之间，正态统计量*Z*值均大于2.58，通过1%水平的显著性检验，表明中国北方农牧交错带耕地分布具有显著的空间自相关性。

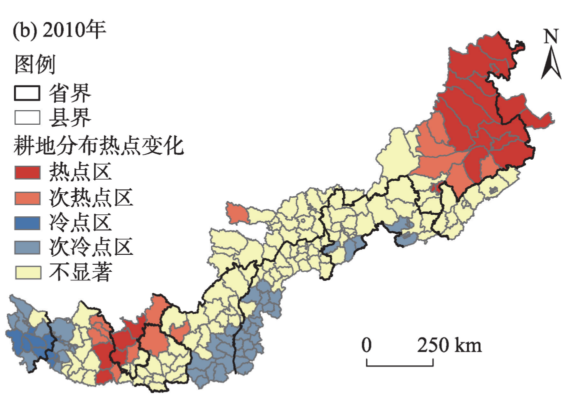
中国北方农牧交错带耕地分布有明显的空间集聚特征（图4）。农牧交错带耕地资源空间分布分为四大区域。耕地主要集中分布在研究区的北部，包括通榆、长岭、突泉县等区域，这里地形较为平坦，农业发达，形成了耕地分布的高值空间集聚区。然而，在研究区西部边缘的贵德、尖扎、临夏县等区域耕地分布较少，形成了低值空间集聚区。这

表3 2000—2020年中国北方农牧交错带耕地分布全局Moran's *I*指数

Tab. 3 Moran's *I* index of cropland distribution in the agro-pastoral ecotone of northern China during 2000—2020

| 年份 | Moran's *I* | 预期指数 | 方差 | *Z*得分(标准差) | *P*值(概率) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2000 | 0.294 | −0.004 | 0.001 | 7.942 | 0 |
| 2010 | 0.289 | −0.004 | 0.001 | 7.795 | 0 |
| 2020 | 0.293 | −0.004 | 0.001 | 7.905 | 0 |



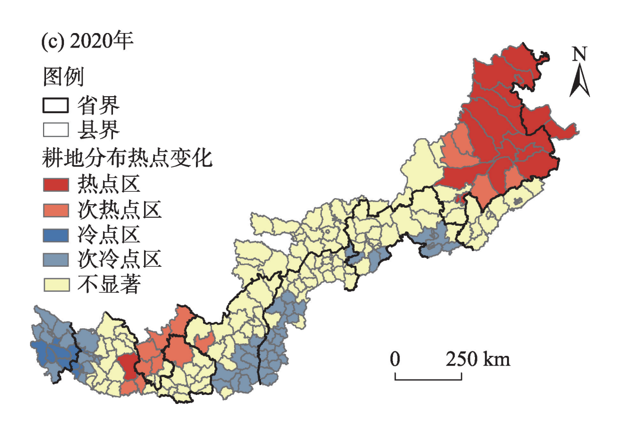




图4 2000—2020年中国北方农牧交错带耕地热点分析

Fig. 4 Getis-Ord Gi* of cropland in the agro-pastoral ecotone of northern China during 2000—2020

主要是因为这里地形复杂,是中国重要的山区,海拔及坡度相对较高。次热点区主要分布在热点区周围,包括原州区、盐池县、西吉县、翁牛特旗、巴林右旗等区域。耕地在农牧交错带西部的湟源、同仁、和政县等区域以及位于黄土高原丘陵沟壑区的汾西、宜川、延长县等区域分布较少,形成了耕地分布的次冷点区。总体上,中国北方农牧交错带中吉林、内蒙古、甘肃、宁夏的县域耕地面积明显高于青海、山西、陕西等县域。

2000—2020年中国北方农牧交错带耕地分布热点区先扩展后收缩,冷点区与热点区变化趋势相反。由图4可知,2000—2010年热点区域由13个县区扩张为21个县区,通渭县、西吉县成为新的热点区,靖远县和平川区成为新的次热点区,阿鲁科尔沁旗由热点区降为次热点区,化德县和保康县从次热点区中消失;冷点区变化较小,仅互助土族自治县从次冷点区中消失。对比2010年和2020年研究区耕地分布热点区收缩,翁牛特旗由次热点区转变为热点区,而同心县、海原县、西吉县和通渭县4县由热点区降为次热点区,固阳县、靖远县、平川区等地从次热点区中消失;冷点区向东北部扩展,互助土族自治区重新成为次热点区,宜君县和古交市转出而怀来县、承德县和宽城满族自治县3县转入次冷点区。总体而言,2000—2020年中国北方农牧交错带耕地分布的冷热点总体变化不大,局部地区发生小规模变化。

### 3.3 中国北方农牧交错带耕地时空分异的影响因素

基于ArcGIS和GeoDa平台,通过检验耕地分布空间自相关性并运用Lagrange Multipliter(LM)检验进行空间计量模型的选择。普通最小二乘法的诊断结果表明,2000年和2020年空间误差模型LM和Robust LM均通过了1%水平的检验。因此,空间误差模型对中国北方农牧交错带耕地时空分异的影响因素估计效果较好。计算结果显示,中国北方农牧交错带耕地空间分异是自然环境、社会经济、政策等多种因素共同作用的结果。

**3.3.1 自然因素** 气候与地形因素是影响水热条件和人类耕作活动的重要因子,直接影响耕地的空间分布格局。由表4可知,自然因素对中国北方农牧交错带耕地时空分异具有重要影响。2000年中国北方农牧交错带耕地空间分布对气候、地形条件依赖性较强,其中年平均气温、高程、坡向与耕地空间分布呈正向作用,其影响系数分别为437.466、

表4　2000—2020年中国北方农牧交错带耕地时空分异的驱动因素

Tab. 4　Driving factors of spatio-temporal differentiation of cropland in the agro-pastoral ecotone of northern China during 2000—2020

| 变量 | | 2000年影响因素 | | 2020年影响因素 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 系数 | $P$ | 系数 | $P$ |
| 常数 | | 228.510 | 0.376 | −104.804 | 0.968 |
| 自然因素 | 年平均降水量 | −0.582 | 0.515 | 0.752 | 0.370 |
| | 年平均气温 | 437.466*** | 0.000 | 426.409*** | 0.000 |
| | 高程 | 3.900** | 0.050 | −0.516 | 0.777 |
| | 坡度 | −5202.760*** | 0.000 | −5242.810*** | 0.000 |
| | 坡向 | 8.811* | 0.075 | 7.518 | 0.134 |
| | 地形起伏度 | 16.015 | 0.278 | 25.655* | 0.087 |
| 社会经济因素 | 经济密度 | −29.564*** | 0.000 | −2.218*** | 0.000 |
| | 人口密度 | 4.878 | 0.267 | −2.616 | 0.167 |
| | 路网密度 | 6.080*** | 0.000 | 3.175*** | 0.000 |
| 区域政策因素 | 生态退耕政策 | 3396.050*** | 0.000 | 1999.360** | 0.017 |
| | 土地利用管制 | 9171.290*** | 0.000 | 8162.700*** | 0.000 |
| 拟合系数$R^2$ | | 0.755 | | 0.741 | |
| 对数似然值 | | −83642.578 | | −83752.834 | |
| 赤池信息准则 | | 12 | | 167530 | |
| 施瓦茨准则 | | 7517 | | 167613 | |

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%水平上显著；$P$为置信水平。

3.900、8.811，分别通过1%、5%、10%水平的显著性检验。气温和高程、坡向在一定程度上反映了区域宏观地理背景，干旱、半干旱地区农业耕作对热量、降水和光照依赖性较强，光照充足的阳坡，热量较丰富，较适宜农业耕作，耕地分布较集中。地势较为低平的区域，人口密集、人类活动频繁，建设密度较大，耕地非农流失严重，为保障区域粮食安全耕地分布具有一定的海拔梯度。2020年区域气候、地形因子对耕地分布的限制性有所减弱，其中年平均气温、地形起伏度对耕地空间分布呈正向作用，其回归系数分别为426.409、25.655，分别通过1%、10%水平的显著性检验。2000—2020年，坡度与耕地空间分布均呈负相关，回归系数分别为−5202.760、−5242.810，且均通过1%水平的显著性检验。随农业现代化水平提高，温室大棚的建设等设施农业基础条件的发展，气温、坡向对农业生产的限制减弱，对耕地空间分布的影响降低。坡度作为农业生产的制约因素，随坡度增大，农业机械化、产业化发展受到限制。此外，2000年以来，生态退耕、退耕还林（草）等生态政策的实施，坡度对耕地时空分异的影响程度显著增强。

**3.3.2　社会经济因素**　社会经济因素是影响中国北方农牧交错带耕地时空分异的重要因素（表4），其中地区生产总值、路网密度对中国北方农牧交错带耕地时空分异的影响显著，均通过1%水平的显著性检验。2000年和2020年地区生产总值与耕地时空分异呈负向作用，回归系数分别为−29.564和−2.218，表明经济发展水平较高地区人类活动强度大、建设用地持续扩张，耕地非农流失严重；随人口数量增加，为满足人们对粮食的需求耕地向经济发展水平较低的地区扩展。2000—2020年受退耕还林还草工程及生态文明建设战略的影响，经济发展水平对耕地分布的影响逐渐减弱，耕地流失在一定程度上受到控制。2000年和2020年路网密度与耕地时空分异呈正向作用，回归系数分别为6.080和3.175。中国北方农牧交错带地处干旱、半干旱地区，经济发展水平较低，人口外流严重，从事农业生产的人口不断减少且以老人和妇女居多，耕作半径逐渐缩小，道路通达性对耕地时空分布的影响逐渐减弱。

**3.3.3　区域政策因素**　区域政策反映了区域政府部门对耕地布局与配置的宏观调控，是中国北方农牧交错带耕地时空分异的重要推动力。2000年和2020年土地利用管制政策、生态退耕政策与耕地空间分布均呈正相关。其中，土地利用管制政策对耕地时空分异的影响系数分别为9171.290、8162.700，

均通过1%水平的显著性检验，表明区域土地利用管制措施对耕地空间格局的引导作用显著；生态退耕政策对耕地时空分异的影响因素分别为3396.050、1999.360，分别通过了1%、5%水平的显著性检验。2000年以来，中国北方农牧交错带先后开展了三北防护林四期工程、京津风沙源治理工程、退耕还林还草等生态建设工程，经过20 a的发展这些生态工程空间格局基本形成，生态退耕政策对耕地空间分布的影响程度逐渐减弱。

空间误差模型计算显示，自然因素、社会经济因素和政策因素对农牧交错带耕地资源时空分布具有显著影响。2000—2020年，耕地时空格局演变的关键因子由年均气温、坡度、地区生产总值、生态退耕政策和土地利用管制变为年均气温、坡度、生态退耕政策和土地利用管制，其中坡度因子的影响增强，年均气温、地区生产总值、生态退耕及土地利用管制的影响减弱。

## 4 讨 论

中国北方农牧交错带位于中国干旱、半干旱区，受自然条件和人文因素的综合影响土地利用变化剧烈。气候条件和宏观地形条件等自然因素作为耕地分布的基础条件在一定程度上决定了耕地的总体分布格局。本研究运用趋势分析、空间自相关分析、空间热点探测模型探究2000—2020年中国北方农牧交错带耕地分布的时空格局特征，结果显示2000—2020年研究区耕地分布整体呈现东高西低、北高南低的空间格局，空间集聚特征显著。2000—2020年研究区耕地集中分布于吉林、辽宁和内蒙古3省区交界的平原地区以及甘肃、宁夏境内的黄河谷地，形成耕地分布的两大热点地区，这主要是由于这些地区地势较为低平，灌溉水源较为充足，适宜于农业耕作。青藏高原的东部边缘区及山西、陕西交界地区的黄土丘陵沟壑区耕地分布较为零散，于青海省湟中、尖扎县等区域以及山西、陕西交界处的汾西、乡宁、娄烦、古交县等县域形成耕地分布的冷点、次冷点区，前者海拔较高、气温较低不利于农业生产，后者山地、丘陵、高原相间分布地形复杂，水土流失严重，不适宜进行农业耕作。该结论与孙丕苓等[26]、刘超等[2]、张翀等[27]的相关研究结论基本一致。

耕地是人类生产生活的重要载体，其时空格局变化受人类经济活动与区域政策的影响。本研究运用空间计量模型分析2000—2020年中国北方农牧交错带社会经济因素与政策因素对耕地时空分异的影响。结果表明：经济密度和路网密度等社会经济因子对耕地时空分异的影响显著，其中经济密度呈负影响，道路密度呈正影响。21世纪以来，工业化、城镇化进程的快速推进促使研究区内社会经济发展水平快速提高，建设用地持续扩张，耕地非农流失严重。这与刘孟竹等[28]的研究结果一致，具有一定的信服力。与此同时，2000年以来，该区域大力推行退耕还林还草政策，三北防护林四期工程、京津风沙源治理工程、太行山绿化工程等生态建设工程相继实施，大量坡耕地逐渐退还为林地、草地，耕地的时空格局发生明显变化。受粮食安全保障压力的驱动，现有耕地受到大力保护，高标准基本农田建设项目持续推行，截至2020年中国北方农牧交错带耕地空间格局基本稳定。该结论与张翀等[27]对黄土高原植被覆盖变化的人文影响研究结果相一致，具有一定的信服力。在社会经济因素和政策因素共同作用下，耕地与林地、草地、建设用地之间变化明显，主要表现为耕地向林地、草地、建设用地的转化。这与刘孟竹等[29]、黄越等[30]的研究结果一致。

本文运用空间误差模型定量分析自然环境、社会经济、区域政策等因素对中国北方农牧交错带耕地时空分异的影响。这部分研究中仍有一些不足之处，如在分析耕地时空分异的政策因素时仅考虑了该区域退耕还林还草政策及相关生态建设工程的覆盖范围，没有考虑政策实施强度方面的影响，其他政策因素仅在文中进行了简单的定性描述而未进行定量分析。因此，如何更加准确地分析政策因素对耕地时空分异的影响还有待进一步深入探讨。

## 5 结 论

本文综合运用土地利用转移矩阵、GIS空间分析和空间回归模型，探究了2000—2020年中国北方农牧交错带耕地时空分异特征及影响因素。得出以下结论：

（1）2000—2020年中国北方农牧交错带耕地面

积由268959.49 km$^2$增加到269471.62 km$^2$，耕地与草地间的相互转化是耕地变化的主要类型。耕地转草地的面为32577.46 km$^2$，草地转林地的面积为40860.07 km$^2$。耕地的垂直变化主要集中于海拔1000~2000 m以及坡度0~5°的地区。

（2）2000—2020年中国北方农牧交错带耕地分布整体呈现东高西低、北高南低的空间格局。耕地集中分布于吉林、辽宁和内蒙古3省区交界的平原地区以及甘肃、宁夏境内的黄河谷地，形成耕地分布的两大热点地区；于青海省湟中、尖扎县等地以及山西、陕西交界处的汾西、乡宁、娄烦、古交县等地形成耕地分布的冷点、次冷点区。耕地分布的冷热点区总体变化不大，局部地区发生小规模变化。

（3）中国北方农牧交错带耕地的时空分异是自然环境、社会经济因素和政策因素共同作用的结果。2000—2020年年均气温、道路密度以及表征生态退耕政策和土地利用管制政策等的解释变量对耕地时空分异呈正向影响；坡度、经济密度等对耕地时空分异的影响均为负向，高程、坡向、地形起伏度等地形因子对耕地时空分异的影响相对较小。

## 参考文献（References）


[1] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3–14. [Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 3–14. ]

[2] 刘超, 霍永伟, 许月卿, 等. 生态退耕前后张家口市耕地变化及影响因素识别[J]. 自然资源学报, 2018, 33(10): 1806–1820. [Liu Chao, Huo Yongwei, Xu Yueqing, et al. Changes in cultivated land and influencing factors before and after the implementation of grain for green project in Zhangjiakou City[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(10): 1806–1820. ]

[3] Chen X, Jiang L, Zhang G L, et al. Green-depressing cropping system: A referential land use practice for fallow to ensure a harmonious human-land relationship in the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. Land Use Policy, 2021, 100: 10497, doi: 10.1016/J.LANDUSEPOL.2020.104917.

[4] 彭建, 杜悦悦, 刘焱序, 等. 从自然区划、土地变化到景观服: 发展中的中国综合自然地理学[J]. 地理研究, 2017, 36(10): 1819–1833. [Peng Jian, Du Yueyue, Liu Yanxu, at al. From natural regionalization, land change to landscape service: The development of integrated physical geography in China[J]. Geographical Research, 2017, 36(10): 1819–1833. ]

[5] Wang C, Ouyang H, Maclaren V, et al. Evaluation of the economic and environmental impact of converting cropland to forest: A case study in Dunhua County, China[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 746–756.

[6] Zhu Y Y, Zhou X Q, Gan Y L, et al. Spatio-temporal differentiation and driving mechanism of the resource curse of the cultivated land in main agricultural production regions: A case study of Jianghan Plain, central China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(3): 858–858.

[7] Li F, Zhou M J, Shao J Q, et al. Maize, wheat and rice production potential changes in China under the background of climate change[J]. Agricultural Systems, 2020, 182: 102853, doi: 10.1016/j.agsy.2020.102853.

[8] Sannigrahi S. Modeling terrestrial ecosystem productivity of an estuarine ecosystem in the Sundarban Biosphere Region, India using seven ecosystem models[J]. Ecological Modelling, 2017, 356: 73–90.

[9] Uisso A, Tanrvermi H. Driving factors and assessment of changes in the use of arable land in Tanzania[J]. Land Use Policy, 2021, 104(2): 105359, doi: 10.1016/J.LANDUSEPOL.2021.105359.

[10] Liu Z J, Liu Y S, Liu Y R. Anthropogenic contributions dominate trends of vegetation cover change over the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. Ecological Indicators, 2018, 95(1): 370–378.

[11] 张兆彤, 李源, 刘国宏, 等. 新疆昌吉州耕地土壤有机质空间变异动态研究[J]. 地理研究, 2021, 40(3): 643–651. [Zhang Zhaotong, Li Yuan, Liu Guohong, et al. Dynamic research on spatial variability of cultivated soil organic matter in Changji Prefecture, Xinjiang[J]. Geographical Research, 2021, 40(3): 643–651. ]

[12] Kadiri W, Fasina A S, Babalola T S. Soil organic carbon concentration and stock of arable land use of two agro-ecological zones of Nigeria[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2021, 20(3): 180–189.

[13] Prvlie R, Patriche C, Borrelli P, et al. Arable lands under the pressure of multiple land degradation processes: A global perspective [J]. Environmental Research, 2021, 194: 110697, doi: 10.1016/J.ENVRES.2020.110697.

[14] Cao Q, Wu J G, Yu D Y, et al. Regional landscape futures to moderate projected climate change: A case study in the agro-pastoral transitional zone of north China[J]. Regional Environmental Change, 2020, 20(2): 1847–1856.

[15] 农业部. 农业部关于北方农牧交错带农业结构调整的指导意见[J]. 中华人民共和国农业部公报, 2016(12): 7–12. [Ministry of Agriculture. Guiding opinions of Ministry of Agriculture on agricultural structure adjustment in northern farming and pastoral ecotone[J]. Gazette of the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2016(12): 7–12. ]

[16] 王介勇, 刘彦随. 三亚市土地利用/覆被变化及其驱动机制研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(8): 1458–1466. [Wang Jieyong, Liu

Yansui. Land use and cover change and its driving forces in Sanya [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(8): 1458-1466. ]

[17] 蒋姣, 孙哲, 赵思远, 等. 淮安市耕地时空变化特征及其驱动因素[J]. 农业工程, 2020, 10(12): 63-69. [Jiang Jiao, Sun Zhe, Zhao Siyuan, et al. Spatial and temporal variation characteristics of cultivated land and its driving factors in Huai'an City[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(12): 63-69. ]

[18] 张钥, 许端阳, 王子玉, 等. 2000—2015年锡林郭勒盟防风固沙服务功能变化驱动因素分析[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 603-614. [Zhang Yue, Xu Duanyang, Wang Ziyu, et al. The interaction of driving factors for the change of windbreak and sand-fixing service function in Xilingol League between 2000 and 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 603-614. ]

[19] 刘敏, 赵翠薇, 施明辉. 贵州山区土地利用变化多尺度空间自相关分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 239-246. [Liu Min, Zhao Cuiwei, Shi Minghui. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land use change at mountainous areas in Guizhou Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20): 239-246. ]

[20] 程浩然, 蒙吉军, 朱利凯. 基于多源地理数据融合的黑河中游土地多功能性时空格局与权衡研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 208-220. [Cheng Haoran, Meng Jijun, Zhu Likai. Spatial-temporal pattern and trade-offs of land multi-function in the middle reaches of the Heihe River based on multi-source geographic data fussion[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 208-220. ]

[21] 陶荣, 孔雪松, 陈翠芳, 等. "二调"以来湖北省耕地变化的时空特征及其驱动因子识别[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 290-295. [Tao Rong, Kong Xuesong, Chen Cuifang, et al. Spatiotemporal change of cultivated land and its driving factors in Hubei Province since the second land resource survey[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 290-295. ]

[22] 李宏, 王红梅. 黑龙江省耕地数量变化及驱动因子分析[J]. 农机化研究, 2007(12): 12-15. [Li Hong, Wang Hongmei. An analysis of dynamic change and driving forces of cultivated land in Heilongjiang Province[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(12): 12-15. ]

[23] 邹欣怡, 赵伟, 蒲海霞. 三峡库区重庆段土地利用转型及生态服务功能价值时空分异特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 267-275. [Zou Xinyi, Zhao Wei, Pu Haixia. Spatial-temporal differentiation of land use transformation and ecological service function value in Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2): 267-275. ]

[24] 曾金伟, 刘辉. 就地城镇化地区耕地细碎化及其影响因素分析——以福建省晋江市为例[J]. 海南大学学报自然科学版, 2020, 38(4): 397-408. [Zeng Jinwei, Liu Hui. Cultivated land fragmentation and influencing factors in in-situ urbanization areas: A case study on Jinjiang, Fujian[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2020, 38(4): 397-408. ]

[25] 付慧, 刘艳军, 孙宏日, 等. 京津冀地区耕地利用转型时空分异及驱动机制[J]. 地理科学进展, 2020, 39(12): 1985-1998. [Fu Hui, Liu Yanjun, Sun Hongri, et al. Spatiotemporal characteristics and dynamic mechanism of cultivated land use transition in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Progress in Geography, 2020, 39 (12): 1985-1998. ]

[26] 孙丕苓, 许月卿, 王数. 环京津贫困带土地利用变化的地形梯度效应分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 277-288. [Sun Piling, Xu Yueqing, Wang Shu. Terrian gradient effect analysis of land use change in poverty area around Beijing and Tianjin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 277-288. ]

[27] 张翀, 白子怡, 李学梅, 等. 2001—2018年黄土高原植被覆盖人为影响时空演变及归因分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 188-196. [Zhang Chong, Bai Ziyi, Li Xuemei, et al. Spatio-temporal evolution and attribution analysis of human effects of vegetation cover on the Loess Plateau from 2001 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 188-196. ]

[28] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 174-182. [Liu Mengzhu, Wang Yanfang, Pei Hongwei. The changes of land use and carbon storage in the northern farming-pastoral ecotone under the background of returning farmland to forest (grass) [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 174-182. ]

[29] 刘孟竹, 张红娟, 王彦芳, 等. 基于土地利用的北方农牧交错带生境质量研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 156-162. [Liu Mengzhu, Zhang Hongjuan, Wang Yanfang, et al. Characteristics of habitat quality in the agro-pastoral ecotone of northern China based on land uses[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 156-162. ]

[30] 黄越, 程静, 王鹏. 中国北方农牧交错区生态脆弱性时空演变格局与驱动因素——以盐池县为例[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 1175-1185. [Huang Yue, Cheng Jing, Wang Peng. Spatiotemporal evolution pattern and driving factors of ecological vulnerability in agro-pastoral region in northern China: A case study of Yanchi County in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 1175-1185. ]

# Spatio-temporal differentiation and driving factors of cropland in the agro-pastoral ecotone of northern China

TAO Zefu[1,2], WANG Shiqing[1,2], SUN Piling[1,2,3], LI Kaidi[1,2],
TIAN Wen[1,2], HAN Xiaoxiao[1,2]

(1. School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276826, Shandong, China; 2. Rizhao Key Laboratory of Territory Spatial Planning and Ecological Construction, Rizhao 276826, Shandong, China; 3. College of Land Science and Technology, China Agriultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Cropland plays an important role in guaranteeing the food security of China. On the basis of remote sensing images from 2000, 2010, and 2020, transfer matrix, spatial autocorrelation analysis, and spatial statistics model were used to analyze the spatiotemporal differentiation characteristics of cropland and its driving factors during the period of 2000 to 2020 in the agro-pastoral ecotone of northern China. The results showed the following: (1) From 2000 to 2020, the area of cropland increased from 268959.49 $km^2$ to 269471.62 $km^2$ in the agro-pastoral ecotone of northern China. The changes in cropland exhibited transformations between cropland and forest land, and grassland, which were mainly distributed in the regions with an altitude of 1000−2000 m and a slope of 0−5°. (2) Obvious spatial agglomeration characteristics of the distribution of cropland were observed during the period of 2000 to 2020 in the agro-pastoral ecotone of northern China. Meanwhile, the spatial pattern of cropland was higher in the east than in the west and was higher in the north than in the south. The cropland was mainly distributed in the junction areas among Jilin, Liaoning, and Inner Mongolia, as well as the river valleys within Gansu and Ningxia, where a plate with a low altitude is found. However, the cropland was scattered in the edge mountains of the plateau and the loess hilly and gully regions, where the terrain was complex, including Huangzhong County, Jianzha County, Fenxi County, Xiangning County, Loufan County, and Gujiao County. (3) From 2000 to 2020, the spatiotemporal differentiation of cropland in the agro-pastoral ecotone of northern China resulted from the interaction of the natural environment, socioeconomic factors, and regional policy factors. The national environment was the primary factor in the spatial distribution of cropland, and socioeconomic factors and regional policy factors were the key driving factors in the spatiotemporal differentiation of cropland in the agro-pastoral ecotone of northern China. The factors of annual average temperature, road density, ecological conversion policy, and land use control system had a positive influence on the spatiotemporal differentiation of cropland, whereas the factors of slope and economic density had a negative impact. This study will provide a scientific reference for cropland protection and sustainable development in the agro-pastoral ecotone of northern China.

**Key words:** cropland; spatiotemporal pattern; driving factors; agro-pastoral ecotone of northern China